振　動　特　集

地震時における原子炉容器内の水の振動…… 95

往復動圧縮機用Vベルトの振動…… 101

シュラウド板で架構した回転翼の振動に関する近似計算と模型実験…… 107

高速回転懸垂軸の振動…… 115

ラップ・ジョイント方式巻鉄心変圧器の騒音…… 119

電気冷蔵庫用圧縮機の振動解析…… 125

電気集じん器放電極の振動解析…… 130

U.D.C. 534.11：550.346：621.039

地震時における原子炉容器内の水の振動

Vibrations of Water in Reactor-Vessels during an Earthquake

加賀万亀男*
Makio Kaga

内　容　梗　概

円筒形と角形の容器を用いて水の振動実験を行なった。この結果，水はほぼ完全な正弦形の振動を行なうこと，低次の振動は顕著であるが，高次のものは現われにくいこと，水中にかなりの量の物体をそう入しても振動の減衰はあまり大きくないことなどがわかった。また，強制振動実験の結果，水の振動は適当な補正を加えることによって1自由度の振動系の重ね合わせとして簡単に取り扱えることがわかった。これらの実験結果を基にして，地震時の水面の変動を押さえるための制水機構について検討した。

1. 緒　　言

各種の原子炉の主体をなす諸容器のなかには内部に水を満たしたような場合がかなり多い。しかも，これらのものは上部に水の運動を抑制するような機構が設けられていないのが普通である。このようなものをわが国のごとく地震がひん繁に起こる地帯に設置する場合には，容器内の水の地震時の挙動が重要な問題となってくる。つまり単なる水といっても，多くの場合は炉心その他の放射線源を付近にもっているので，かなり汚染されていると考えなければならない。このような水が外部から強制力を受けて容器外にあふれ出ると危険な事態を招く可能性がある。また外部にあふれ出ないまでも，地震によって水は予想以上に振動するので，原子炉の制御の面にも影響してくる場合もある。

容器内の水の振動に関してはいくつかの研究がなされており，簡単な実験も行なわれているが，いまだ十分研究されていない面が多い。われわれは振動台を用いて，これに水を満たした容器を積載し，自由振動実験および強制振動実験を行なった。今回の実験で水の振動性状をかなり詳細に知ることができたので，これらについて以下に述べる。またこの結果を他の場合にも応用できるように，簡単な実用計算を試みた。最後に水の振動を抑制する機構について検討を行なった。

2. 実　験　装　置

2.1 振　動　台

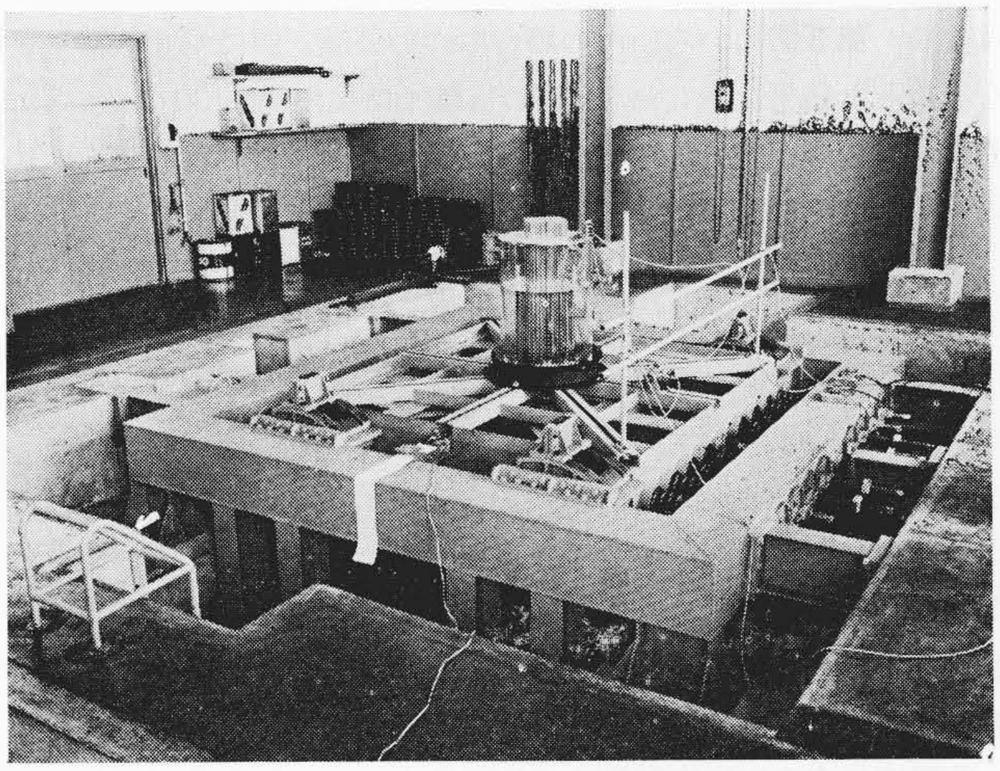
本実験で使用した振動台のおもな性能を次に示す。

最大積載重量	3 t
積載可能面積	2m×2m
最大振幅	10 cm
振動数可変範囲	0.5～20 c/s
最大加速度	3g（gは重力の加速度）
振動方向	水平および上下
振動形	正弦振動

この振動台の可動部は8枚の板バネでつり下げてあり，これにコイルバネを適当に付加して，任意に振動数が変えられるようになっている。このようなバネ支持方式の場合は完全な正弦振動が得られるのが利点である。しかし，バネのみでは振動数の範囲に限度があるので約 7 c/s 以上はアンバランスドマスの回転によって連続的に振動数を変え得るようになっている。

2.2 円筒形および角形容器

今回の実験で主として用いたのは内径 490 mm，高さ 750 mm の円筒容器で，振動中の水の状態を観察するためにアクリル樹脂を使



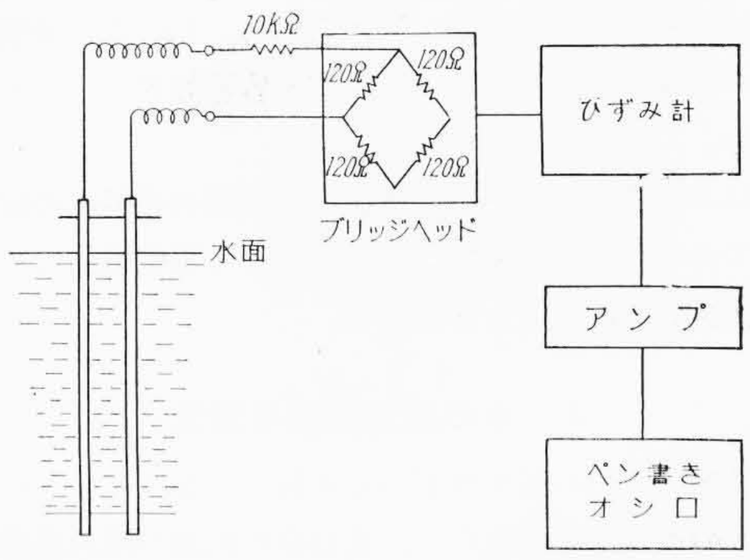
第1図　振動台および円筒形容器

用した。円筒形の容器としてはこのほかに 5 l（内径 174 mm），2 l（内径 127 mm）のビーカを用意して，模型化による振動性状の相似性を検討した。便宜上アクリル容器を A 容器，5 l および 2 l のビーカをそれぞれB，C容器と名づける。AおよびB容器には燃料要素を仮想してそれぞれ直径 10 mm，および 4 mm の丸棒がそう入できるようにした。第1図に振動台とA容器の写真を示す。

一方，研究用原子炉の遮へい実験プールには角形の建造物がしばしば付属することがあるので横 750 mm×縦 480 mm×高さ 750mm の角形容器を製作して同様の実験を行なった。

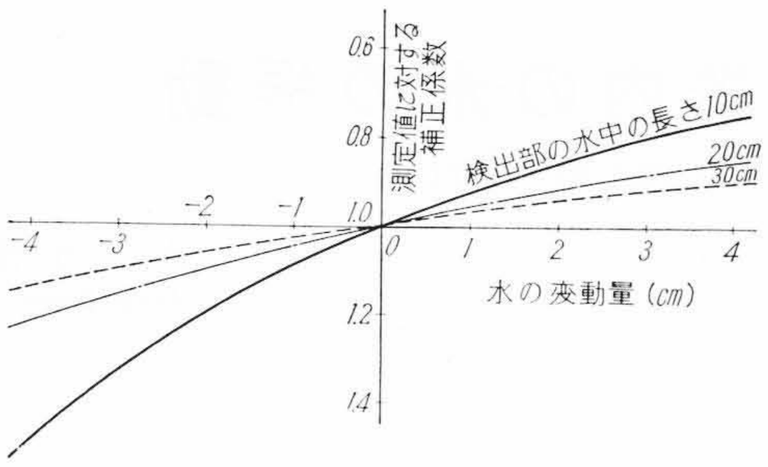
2.3 測　定　装　置

変動する水位を定量的に測定するために，ひずみ計を応用した水位測定器を製作した。検出部は 4 ϕ×40 mm の黄銅棒を2本用いて，取付具で平行に固定したものである。これを水中に浸すと両極は水を媒介にして導通する。つまり両極間の水は両極の水中における長さに関係のある固有の抵抗値を有するわけである。したがっ



第2図　水位測定装置のブロックダイヤグラム

* 日立製作所中央研究所



第3図　水位測定器の特性

て，水面が上下すると両極間にわずかな抵抗変化が生ずる。この抵抗変化をひずみ計で読めばよい。**第2図**に水位測定器のブロックダイヤグラムを示す。検出部の抵抗は水中に浸っている両極の長さに反比例するので，水位の変動量と抵抗の変化量は完全な比例関係ではない。**第3図**にいろいろの場合について測定値に対する補正係数を計算した結果を示した。今回の実験では検出部を30 cm水中に浸した状態で測定を行なったので，±3 cm程度の水位の変動は10%以内の精度で測定できることがわかる。

3. 水の固有振動数の測定

容器に横衝撃を加えて水の自由振動を誘起し，この記録から基本固有振動数を求めた。**第4図**はA，B，Cの各円筒容器を用いて，水深によって固有振動数がどのように変化するかを調べた結果である。同様に角形容器についての実験結果を**第5図**に示す。これらの図からわかるように，固有振動数は水深とともに増加して，ある程度の深さに達するとほぼ一定の値となる。また固有振動数は容器の幅が小さいほど高くなる。

容器内の水の固有振動数についてはすでに理論計算から求めた近似式が得られている。これは水を粘性のない完全流体として，速度ポテンシアルから固有振動数を算出する方法である[(1)(2)]。結果のみを示すと，円筒形の容器については

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g(\gamma_n a)}{a}\tanh\frac{(\gamma_n a)}{a}H} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

f_n：　n次の水の固有振動数（c/s）

a：　容器の半径（cm）

H：　水の深さ（cm）

角形の容器については

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g(\beta_n l)}{l}\tanh\frac{(\beta_n l)}{l}H} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

l：　振動方向の容器幅（cm）

ここで，$\gamma_n a$および$\beta_n l$はそれぞれ次のような値である。

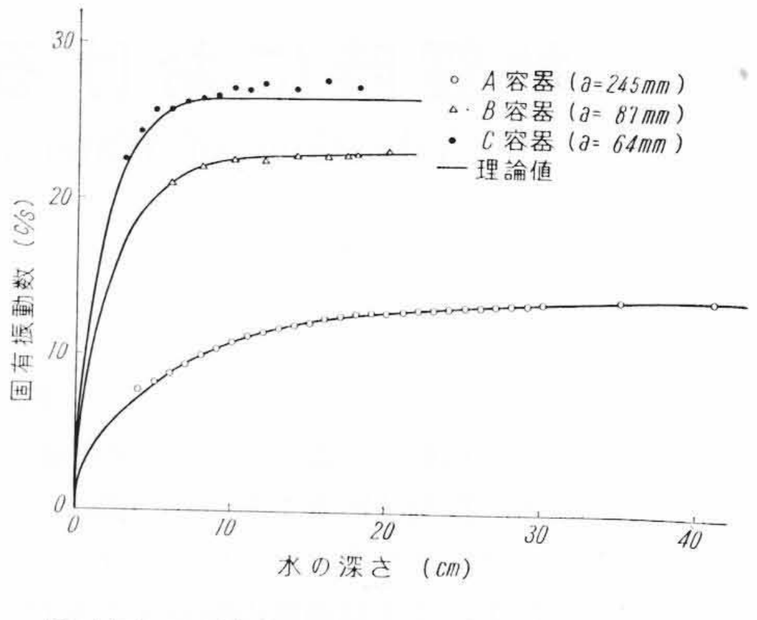
n	1	2	3	4	5
$\gamma_n a$	1.841	5.332	8.536	11.71	14.86
$\beta_n l$	3.142	9.425	15.71	21.99	28.27

（1），（2）式を用いて各容器について計算した結果を**第4図**および**第5図**に実線で示してある。図から（1），（2）式が実験結果とかなりよく一致することがわかる。ただし容器幅の小さいものでは誤差が大きい。

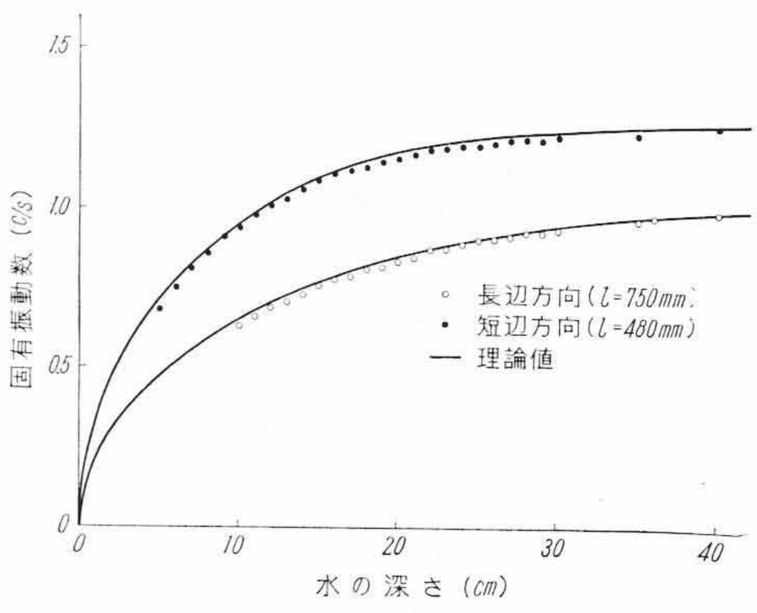
第6図はB形の容器を用いて水温による固有振動数の変化を測定した結果であるが，図から固有振動数はこの実験範囲では水温にはほとんど無関係であることがわかる。

4. 水の減衰係数の測定

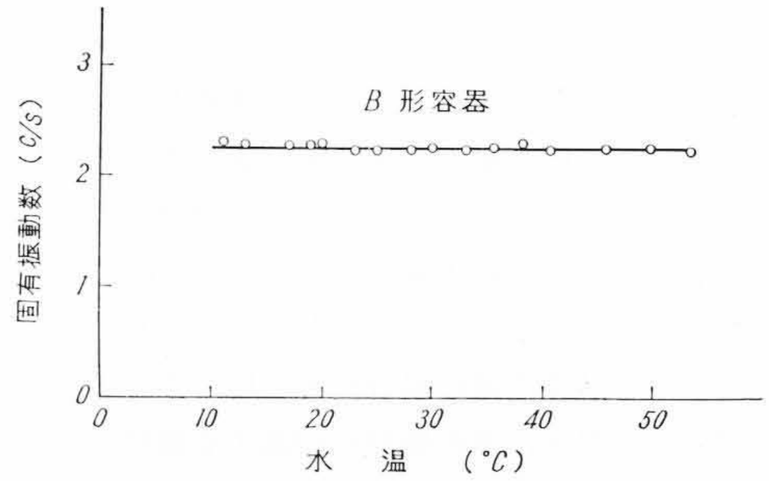
今回の実験では，容器が外部から強制力を受けたときの水の応答を正確に求めるのが目的なので，水自身の振動の減衰係数を定量的に知る必要がある。**第7図**はA形容器内の水の容器壁面における水位の自由振動波形である。内容物による影響を調べるために，模型棒の数を変えて実験を行なった。B形容器についても同様の実験を行なったが，C形および角形の容器では，内容物がない場合についてだけ測定した。得られた自由振動記録の振幅を順に読みとり，最初の振幅を100として各振幅をプロットした例を**第8図**と**第9図**に示した。いずれの場合も片対数グラフ上で振幅が直線的に減少しているので，粘性減衰振動であることがわかる。これらの図の直線のこう配から対数減衰率および振幅の減衰比などが求められる。容器内に模型棒がない場合の値は



第4図　円筒容器内の水の基本固有振動数



第5図　角形容器内の水の基本固有振動数

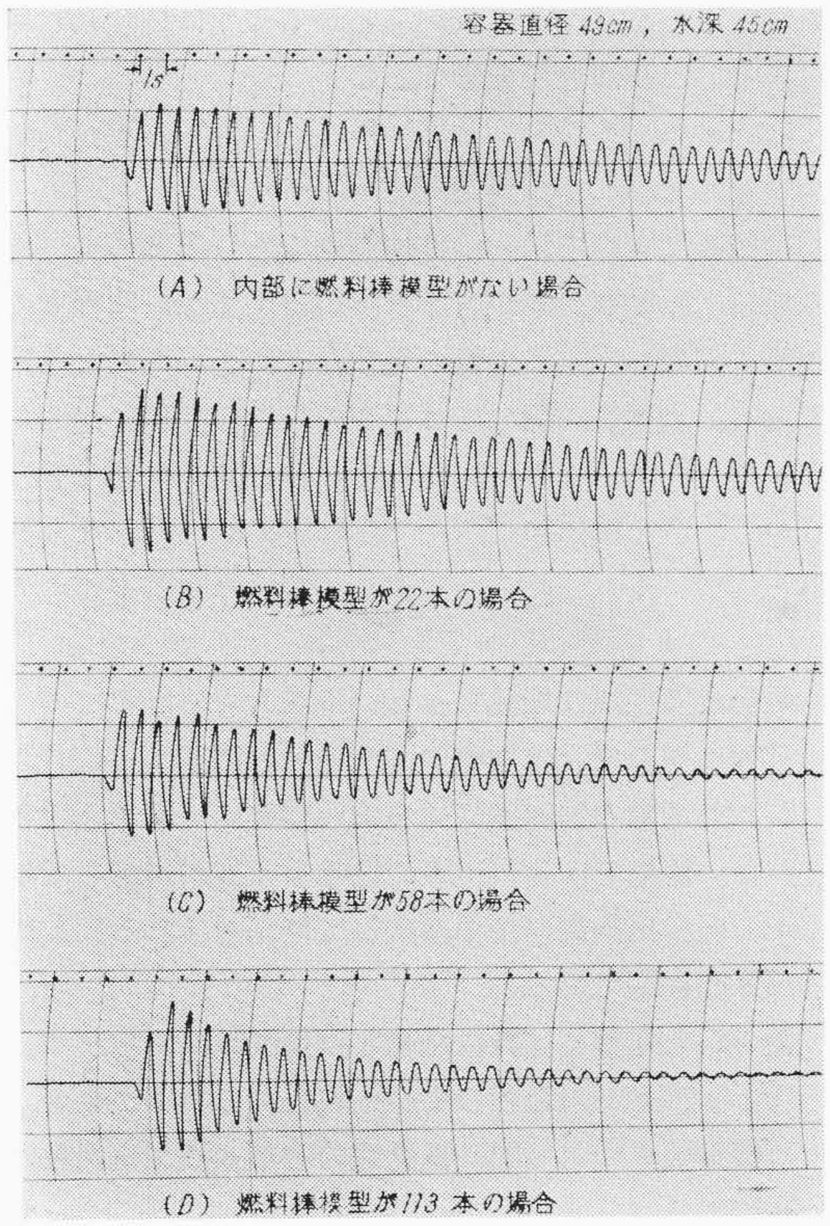


第6図　水温と固有振動数の関係

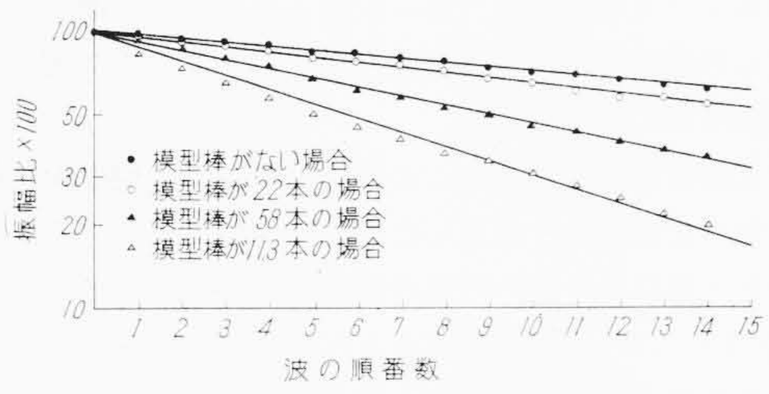
	対数減衰率($n\tau$)	減衰比($e^{-n\tau}$)
A　形　容　器	0.036	0.965
B　形　容　器	0.056	0.930
C　形　容　器	0.137	0.872
角形容器長辺方向	0.004	0.996
角形容器短辺方向	0.010	0.990

これらの結果から，いずれの場合も振動の減衰の度合はきわめて小さく，共振した場合には相当激しく振動することが予想できる。当然のことながら，容器の大きい方が減衰の度合は小さい。

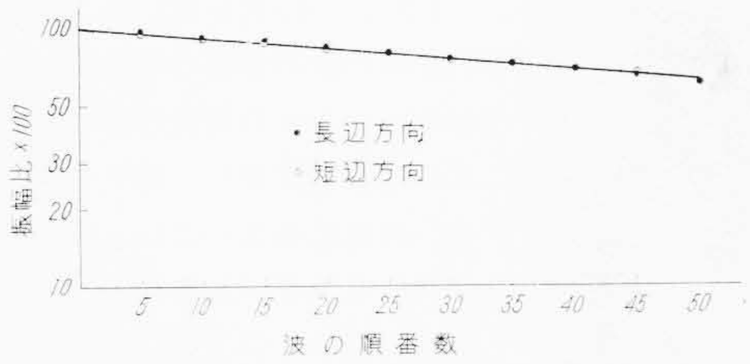
第10図はA形とB形の容器の内部に模型棒をそう入して，その影響を調べた結果である。図のように模型棒の数が増加するにした



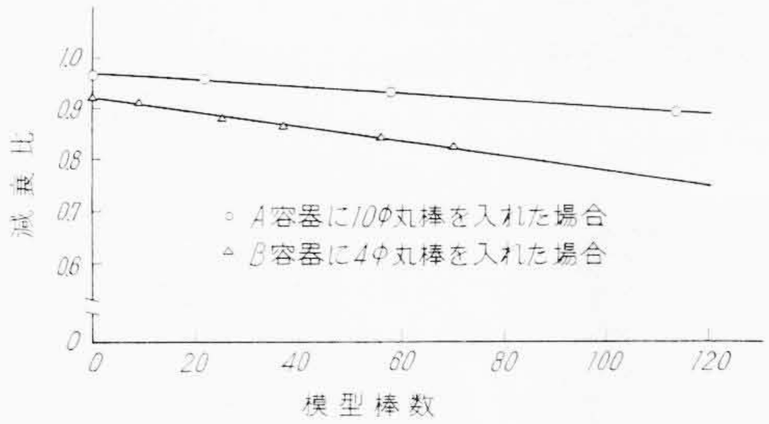
第7図　円筒容器内の水の自由振動波形



第8図　円筒容器内の水の振幅の減衰の様子



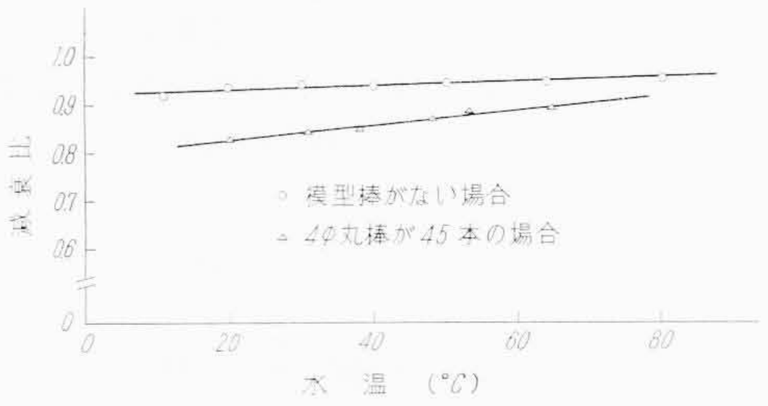
第9図　角形容器内の水の振幅の減衰の様子



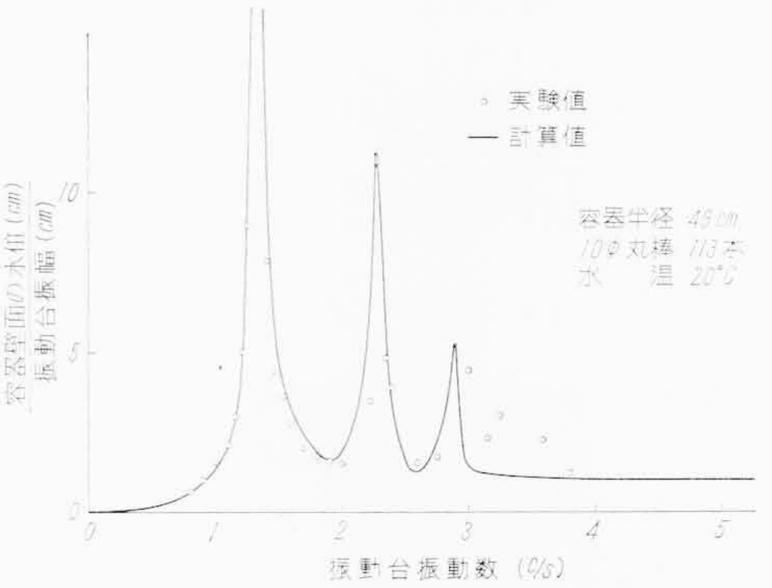
第10図　円筒容器内に模型棒をそう入したときの減衰量の変化

がって，振幅の減衰比はほぼ直線的に減少する（すなわち減衰の度合が大きくなる）。

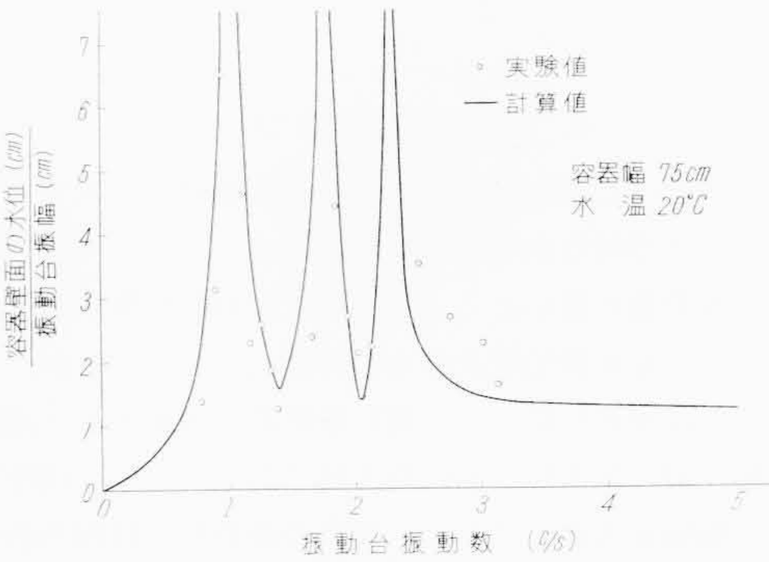
つぎにB形の容器を用いて水温による減衰量の変化を測定した。測定結果を**第11図**に示す。水の粘性係数は水温が高くなるとともに小さくなることは周知のとおりであるが，振動の減衰の度合に関してはそれほど顕著な傾向はみられない。



第11図　水温と減衰量の関係（B容器）



第12図　円筒容器内の水の強制振動



第13図　角形容器内の水の強制振動

5.　水の強制振動実験

強制振動実験はA形容器に模型棒を113本そう入した場合と，角形容器の長辺方向についての場合の2種類の試験を行なった。過渡振動からやや遠ざかったところで，同時刻における振動台の振幅と容器壁面における水位の上昇量の比をとり，これをいろいろの振動数について実験した。その結果は**第12図**および**第13図**に示すとおりである。いずれの場合も共振点近傍では水位の変動がかなり激しかった。

第12図および**第13図**から判断すると，水の定常状態における振幅比の分布は多自由度の質量-バネ系の共振曲線に非常によく似ている。したがって，水の各次数の固有振動数に等しい固有振動数をもつ1自由度の振動系を多数考えて，これらの共振曲線を重ね合わせれば，実験値に近い水の応答の計算式を得る可能性がある。この場合，一般の振動の問題と同様に，高次の振動形に対しては振動の次数に関係のあるなんらかの補正が必要である。固有振動数を算出する際に引用した(1)および(2)式は水の速度ポテンシアルから求めたものであるが，この一連の計算手順で水の振動形を計算する場合に各次数に対して円筒形では $1/[(\gamma_n a)^2-1]$，角形では $1/(\beta_n l)^2$

という項がかかってくる。いま，これらの係数をそのまま流用して振動台が $x_0=X_0\sin\omega t$ なる振動を行なう場合の3次までの水の応答の和をとってみると，円筒形の容器内の水については

$$\frac{X}{X_0}=\frac{1}{(\gamma_1 a)^2-1}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_1^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}+\frac{1}{(\gamma_2 a)^2-1}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_2^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}+\frac{1}{(\gamma_3 a)^2-1}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_3^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}\quad\cdots\cdots\cdots(3)$$

角形の容器内の水に対しては

$$\frac{X}{X_0}=\frac{1}{(\beta_1 l)^2}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_1^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}+\frac{1}{(\beta_2 l)^2}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_2^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}+\frac{1}{(\beta_3 l)^2}\frac{\omega^2}{\sqrt{(p_3^2-\omega^2)^2+4n^2\omega^2}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

ここで　X/X_0：　容器壁面の水位の振幅比

ω：　振動台の固有円振動数（c/s）

p_1, p_2, p_3：　水の固有円振動数（c/s）

n：　水の振動の減衰率（1/s）

（3），（4）式に各数値を入れて計算した結果を**第12図**および**第13図**に実線で示した。図から，実験値とかなりよく一致していることがわかる。

6. 水の振動形について

強制振動実験中に現われた種々の水の振動形のうちで，各次数の振動形を示す典型的な例を**第14図**に示す。振動台の振動数が水の各次の固有振動数に近いところでは各次数の振動形が顕著である。振動形のうちでも比較的低次のものは誘起されやすいが，4次以上の高次のものは現われにくい。高い振動数で加振すると水面は非常に複雑な振動形となるが，水位の上昇はあまり大きくはならない。この場合に振幅を大きくすると，低次の振動形が誘起されやすい傾向があることがわかった。写真からわかるようにいずれの場合もかなりはっきりした正弦形の振動である。

7. 地震時の水の応答

地震動は複雑なもので，一つの地震動をとり上げても，その中には種々の振幅，振動数の波が含まれている。また，同程度の地震でも震央距離，震源の深さ，地盤の種類などによって異なる応答を示すものである。大地震に関しては現在のところ信頼に足る記録が皆無という状態なので，その振幅の程度や振動数の分布などは不明である。しかし，ひん繁に起こる小地震に関してはかなり豊富な資料[3]が得られている。これらを整理して関係のあるもののみを列挙すると

（1）　地震動の振幅は振動数が低いほど大きい。

（2）　近地地震の場合は地盤の固有振動が誘起する。

（3）　かたい地盤の加速度は柔らかい地盤のそれより大きい。

（4）　かたい地盤では3～5c/sの振動数の波が卓越して現われるが，同一振動数の波が連続して繰り返される回数はたかだか8回程度である。

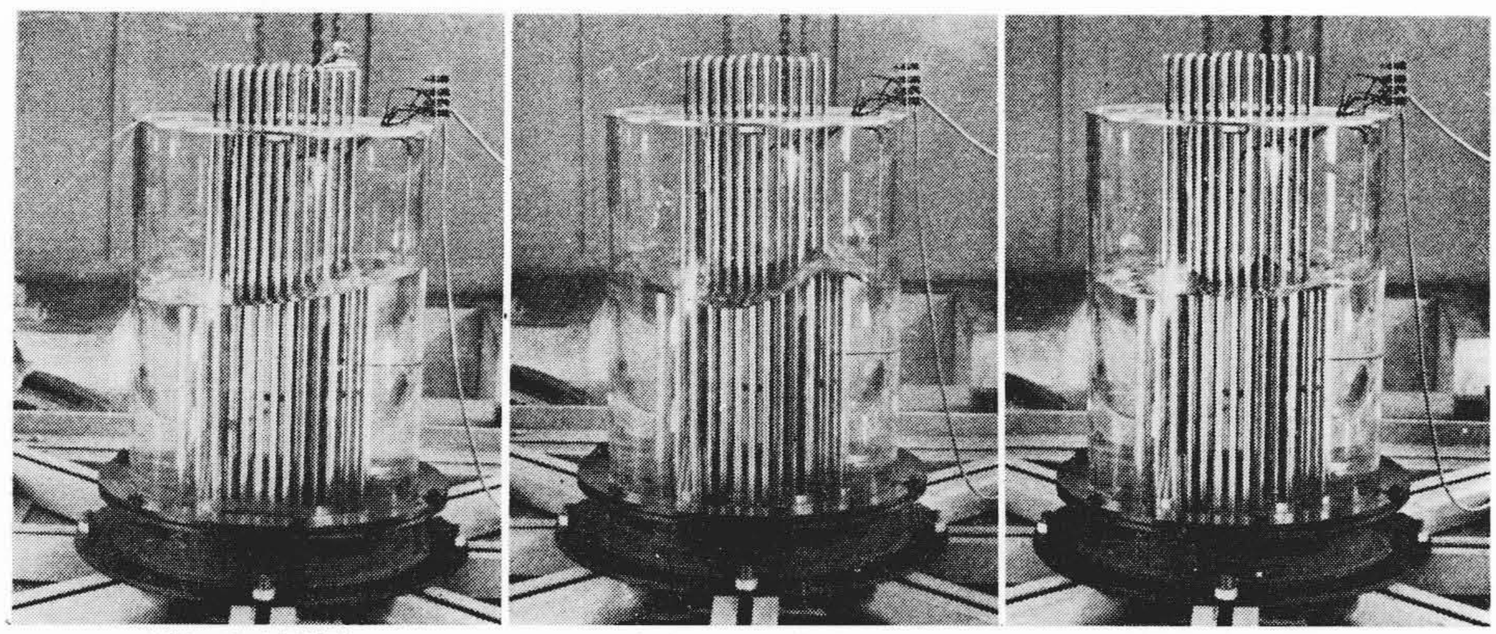
（5）　柔らかい地盤では特に卓越した振動数はみられず，0.8～10c/sぐらいの範囲のものが現われる。この場合，すべての振動数について同一振動数の波が連続する回数は5回程度である。

上に述べたように地震動の振幅，振動数は一様でないので，水の応答を正確に求めるのは非常に困難である。これに加えて，一般に原子炉容器は巨大な建物の一部に設置されるので，地震時の建物の振動性状も考慮に入れなければならないが，ここでは簡単のため，建物の影響は考えない。

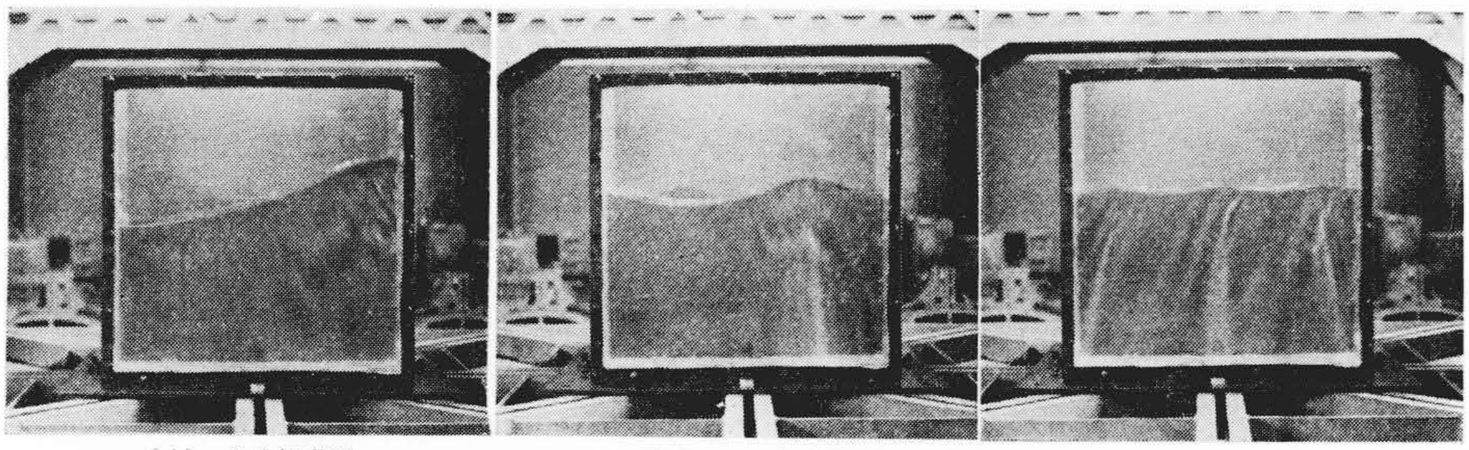
今回は正確な応答を求めることは行なわずに，地震動を振幅，振動数が一定の正弦振動と仮定した場合について検討する。このように仮定すると前に行なった計算の結果をそのまま応用できる。地震動の性質（4），（5）から判断すると，地震動を正弦振動の連続とすることは水位の上昇量を評価する場合にはかなり安全側であるといえる。

（3），（4）式を用いて，半径が0.5mと1mの円筒形容器の場合，および容器幅が3mと5mの角形容器の場合について水の応答を計算した結果を**第15図**に示す。内部に物体がはいっていて減衰係数が異なる場合があるので，減衰率が0.05, 0.10, 0.20 s^{-1}の三通りについて計算してある。これらの図から容器の大きさと内部の状態がわかれば，地震振幅と水位の上昇量の比がただちに求められる。いずれの場合も3次までの水の固有振動数が1～3c/sという比較的低い値なので，かたい地盤上に容器を設置する場合はほとんど共振する可能性はない。

一方，柔らかい地盤の場合は地震動のなかに容器内の水の固有振動数に一致するものが含まれる場合もあるので，十分注意しなければならない。A容器では水面から容器の上部まで約30cmであるが，振動台の振動数を水の固有振動数に近い値にして振幅をある程度以上に大きくすると，相当量の水が外部に飛び出した。また，共振状態になると振動面が容器の

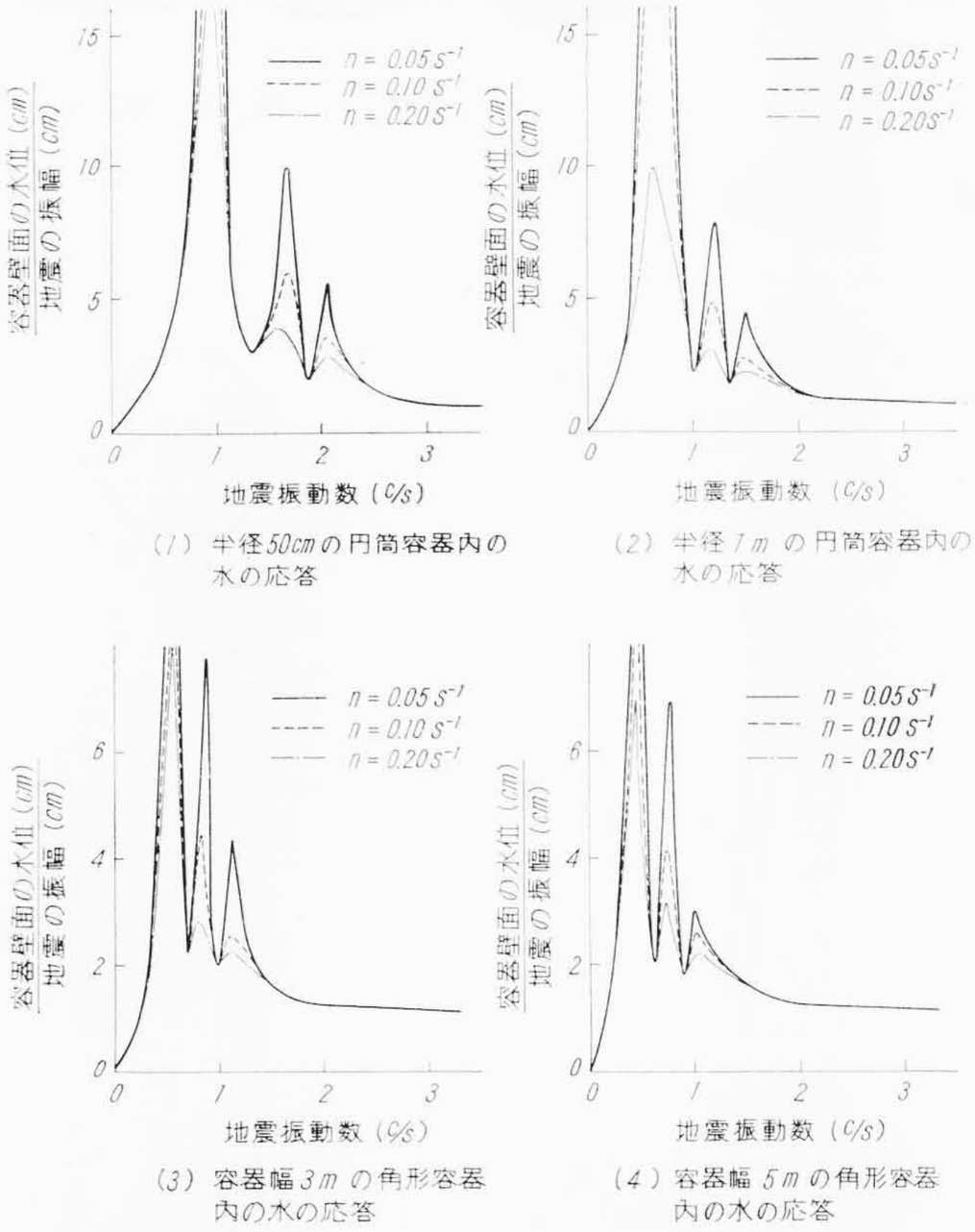


（1）　1次振動形（振動台1.24c/s）　（2）　2次振動形（振動台2.22c/s）　（3）　3次振動形（振動台3.15c/s）



（4）　1次振動形（振動台1.11c/s）　（5）　2次振動形（振動台1.64c/s）　（6）　3次振動形（振動台2.57c/s）

第14図　容器内の水の振動形（1）～（3）A形容器，（4）～（6）角形容器（長辺方向）



(1) 半径50cmの円筒容器内の水の応答　(2) 半径1mの円筒容器内の水の応答

(3) 容器幅3mの角形容器内の水の応答　(4) 容器幅5mの角形容器内の水の応答

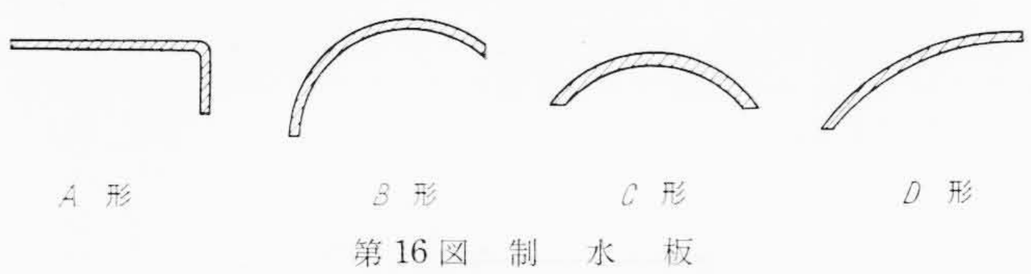
第15図　いろいろの大きさの容器内の水の地震時の応答

中心を通る軸のまわりに激しく回転するのがみられた。このことは他の文献(4)でも確められている。前にも述べたように，実際の地震動では同一振動数の波が連続して起こる回数は5～8回ぐらいであるが，今回の実験で水の減衰係数はきわめて小さいことがわかったので，たとえ5回でも共振振動数の強制力を受けた場合はかなり水位が上昇する。

8. 水の振動抑制機構について

今まで述べた実験結果から水の基本的な振動性状を知ることができたので，ここでは容器内の水の変動を効果的に軽減するような機構について考える。

水の振動形は容器の中心を通る軸に対して逆対称な正弦形であり，壁面では必ず腹となるような振動である。したがって，低次のものについては，壁面に沿って上昇しようとする水だけを押さえても全体の振動を軽減するのにかなり効果があるものと思われる。われわれは第16図に示すような断面をもつ4種類の円環状の板(以下制水板と名づける)を製作して，水面に近い位置に固定し，制水効果を比較した。制水効果を理論的に計算するのは困難なので，写真撮影の結果からその良否を判定した。振動台の振動数を水の基本固有振動数に近い値に設定し，振幅を1cmにして加振したときの様子を第17図に示す。制水板がない場合の容器壁面における水の上昇量は約15cmであるが，制水板を用いると，水はこれより上部へはほとんど達しない。しかし制水板があるために，壁面で水の運動が妨げられるので，中央部ではかなり複雑な振動が起こる。このためB，C，D形の制水板では程度の差こそあれ，水の一部が容器外に飛び出す場合もあった。これに対してA形の制水板では中央部でも激しい水の変動は起こらず，かなり制水効果がよかった。



第16図　制　水　板

実際に制水板を設計する場合，制水板の幅と水面からの位置は容器を設置しようとする地域の地震動の性質，および許容できる水位の変動量から決めるべきである。

9. 結　　言

以上，容器内の水の振動実験の結果を述べたが，今回の実験で水の基本的な振動性状をかなりはっきり知ることができた。とくに振動の減衰の度合をいろいろの場合について定量的に測定できたことは大きな収穫であった。

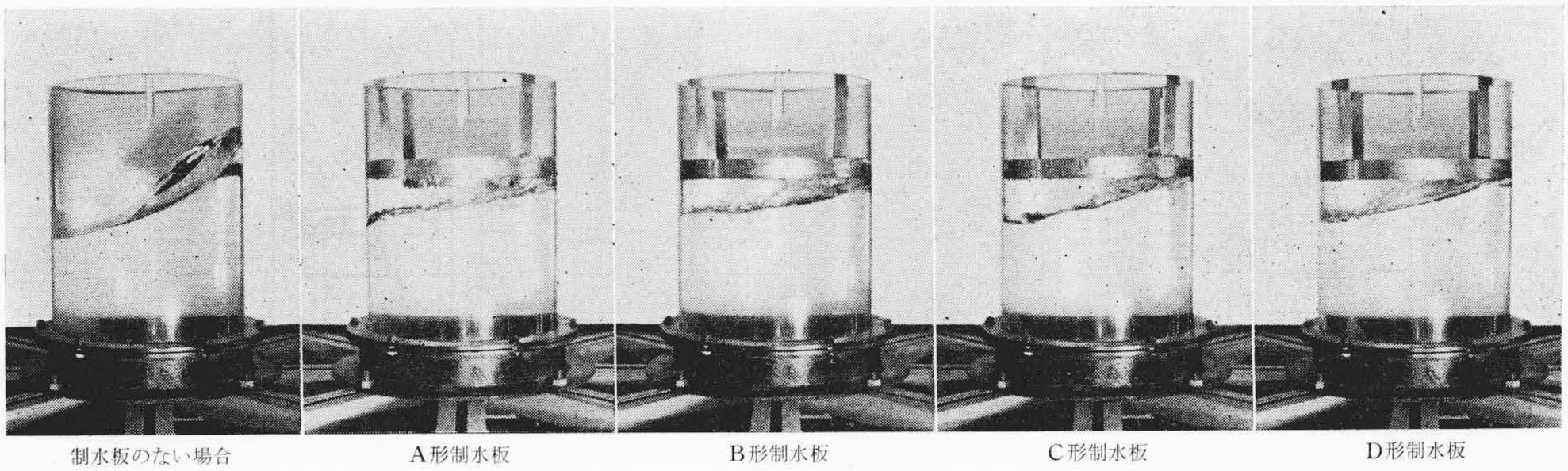
地震の際の水の応答に関しては地震動をどのように仮定するかによって異なる結論が出てくるが，今回は最も一般的な方法を用いた。実際問題として水の振動を扱う場合には建物の振動も考慮しなければならないので，かなりめんどうな解析が必要になってくる。しかし，この場合でも水の応答がわかっていれば，建物との連成系として解くことができる。

今後の課題としては，電子計算機を用いて標準の地震記録に対する水の応答を正確に求め得るような方式を確立することである。

終わりに本研究に着手する際，貴重なご助言とご援助を与えられた建設省建築研究所久田，中川両博士に厚くお礼申しあげる。研究の遂行に当たっては，いろいろ資料を提供してくださった日立製作所日立工場の島井課長をはじめとする原子力課の各位，ならびに日立製作所中央研究所斎藤主任研究員，また実験面では適切なご指導をいただいた日立製作所中央研究所明山部長ならびに歌川主任研究員に深く感謝の意を表する。

参　考　文　献

(1) K. Nakagawa: Technology Reports of Osaka Uni., 4, 248 (1954)
(2) K. Nakagawa: Technology Reports of Osaka Uni., 9, 107 (1959)
(3) たとえば金井，鈴木：震研彙報 32, 189 (昭29)
(4) R. R. Beerlot: J'l of App. Mech., 26, 513 (1959)



第17図　制　水　板　の　効　果　(振動台振動数 1.24 c/s，振動台振幅 1 cm)

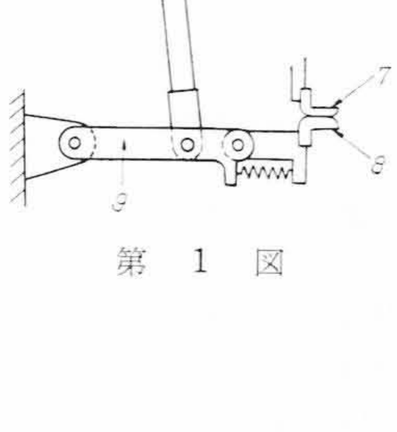
新案の紹介

登録新案 第544251号

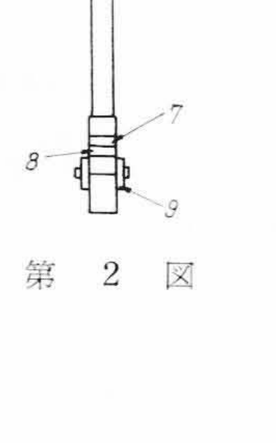
高橋健造

カム形接触器

回転電機の運動制御に使用されるカム形接触器は，回転軸1上に多数の作動カム2を並設して，これらの各カムに対向する各接触器が設けられているが，各接触器の接点7，8を開閉操作する開閉杆(かん)9はいずれも作動カム2の面と平行，すなわち回転軸1に対して直交して設けられている。したがって多数の接触器を有する場合，各接触器は回転軸1上に並設された各作動カム2の隣接カム間隔と同じ間隔を保って並設されるため，特に高電圧回路用のカム形接触器の場合各カム間隔が大きくなって装置全体が大形になる欠点があった。この考案は接触器の開閉杆9を回転軸1と平行，すなわち作動カム2の面と直交するように配置するとともに開閉杆9と操作レバー4とを連結杆13および自在接手14を介して連結したものである。このようにすれば接触器は作動カム2に近接して設ける必要はなく適当な空間に設けることができる。また接触器および作動カムが多数並設されるような場合でも各接触器のすきまだけを大きく取ることが可能となり，特に高電圧回路を開閉するカム形接触器に適用して非常に有利である。 (岩　田)



第　1　図



第　2　図

登録新案 第454290号

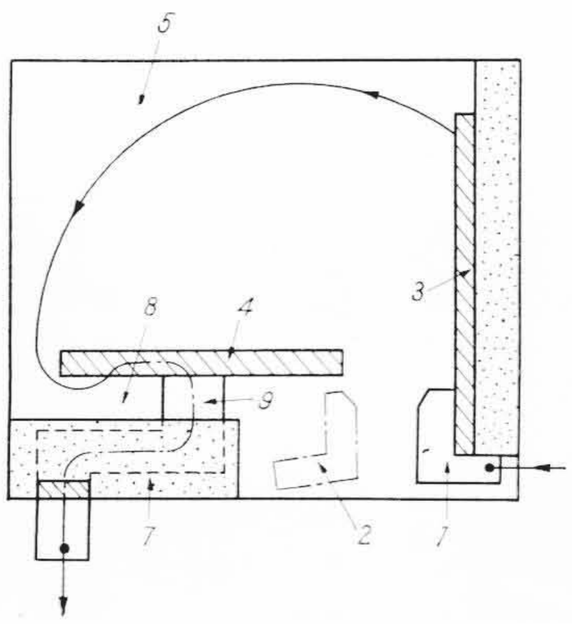
泉　千吉郎・白土忠治

火花樋

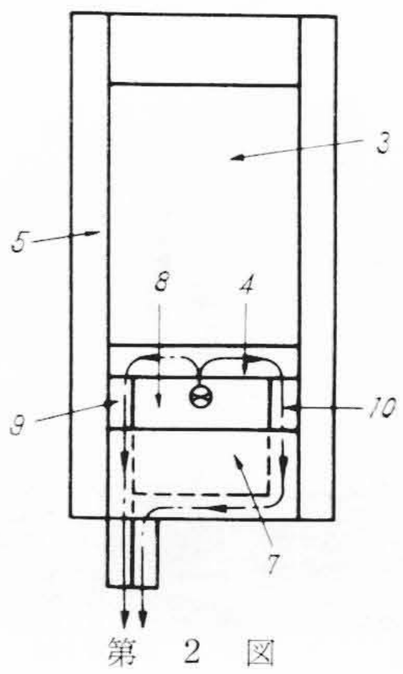
磁気接触器や遮断器などでは，接点間に発生したアークをすみやかに消去するためアークシュートを使用する。

この考案はアークシュートの可動接触子側電弧角の裏面に凹窩(おうか)を形成し，ここにアークの脚を引き込み二次的な消弧効果を特に強化したものである。

本考案の構造を**第1図**および**第2図**に示す。接触子1，2に隣接して電弧角3，4が設けられ可動接触子側電弧角4の裏面と塞壁7との間に凹窩8が形成され，この凹窩を電弧角4とこの電弧角4より分岐し隔壁5の内面に沿って下方に延び，その下辺を塞壁7内に埋め込んだ導体9，10とからなる環状導体で囲んだものである。接触子1，2が開離するとアークが発生し，このアークはそれぞれの接触子に隣接した電弧角3，4に移り電弧角に沿って上方へ引き伸ばされて一次的な消弧作用を受ける。次に電弧角4上のアーク脚部は電弧角4の裏面に形成された凹窩8内にはいり込み凹窩内のガス圧力により強力な消弧作用を受ける。これを二次的消弧効果と呼んでいる。この考案は二次的消弧効果を凹窩8を囲んだ環状導体9，10を**第2図**に矢印で示すように，分流する電流によって生ずる電磁力を凹窩内に進入した電弧脚部に作用させることにより更に助長したものである。このようにすれば，電弧角3，4間に伸張された電弧の可動接触子側電弧角4側の電弧脚に対し強力な二次的消弧効果を作用させることができ，電弧の消滅を一次的消弧効果のみに頼る従来のアークシュートに比べ消弧性能のすぐれたアークシュートを得ることができる。 (岩　田)



第　1　図



第　2　図